

STAND CONDITION AND CANOPY STRUCTURE EVALUATION METHODS OF GRAIN CROPS

METODY HODNOCENÍ STAVU A STRUKTURY POROSTU OBILNIN

Coufalová O. , Křen J.

Ústav agrosystémů a bioklimatologie , Agronomická fakulta, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika.

E-mail: coufalova@vukrom.cz, kren@mendelu.cz

ABSTRACT

The objective of our research was to apply new methods of canopy (winter wheat and spring barley) structure evaluation. We have stated three basic hypotheses: **i.** is it possible to tell the canopy structure (density) by remote sensing, **ii.** is it possible to tell the effect of nitrogen fertilization by remote sensing, and **iii.** are we able to detect the canopy spectral characteristics variability caused either by agrotechnology or by genotype? The readings were carried out at certain growth stages (DC 25, DC 31, DC 37, DC 55, DC 65, and DC 91) by multispectral camera MS 3100 (Duncantech) at two different locations: Žabčice (maize-growing region) and Kroměříž (sugar beet-growing region). The interactions between crop spectral characteristics, the amount of above-ground biomass, canopy structure, and the amount of nutrients in plants will be analyzed by correlation and regression analyses. The Erdas Imagine 8.5 software is being used for image analyses of corrected multispectral images to evaluate the heterogeneity of the crop.

Keywords: electromagnetic spectrum, atmospheric windows, reflection, absorption, transmission, scattering, crop spectral characteristics.

ABSTRAKT

Cílem našeho projektu je použití nových metod hodnocení stavu porostu (ozimé pšenice a jarního ječmene). Stanovili jsme tři pracovní hypotézy: **i.** jsme schopni snímkováním rozlišit strukturu porostu (hustotu), **ii.** jsme schopni snímkováním rozlišit vliv dávek dusíku, **iii.** dokážeme zjistit rozsah variability spektrálních vlastností porostu na základě agrotechnických zásahů a genotypových rozdílů? Měření multispektrální kamerou MS 3100 nad porosty byla prováděna: v plném odnožování – DC 25, ve sloupkování – DC 31, DC 37, v metání – DC 55, v kvetení – DC 65 a v plné zralosti – DC 91. Snímkování bylo realizováno na dvou odlišných lokalitách: Žabčice (KVO) a Kroměříž (RVO). K hodnocení vztahů mezi spektrálními charakteristikami porostu, množstvím nadzemní biomasy, její strukturou a obsahy živin v rostlinách bude použita korelační a regresní analýza. Heterogenita porostu je vyhodnocována analýzou obrazu programem Erdas Imagine 8.5.

Klíčové slova: elektromagnetické spektrum, atmosférická okna, reflexe, absorpce, transmise, rozptyl, spektrální charakteristika rostlin

ÚVOD

Elektromagnetické záření

Základní příčinou všech jevů a dějů na zemském povrchu a v atmosféře je sluneční záření, které je tvořeno celým spektrem nejrůznějších částic a fotonů všech vlnových délek. Elektromagnetické záření se šíří formou vln sinusoidního tvaru s konstantní rychlostí ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$). Každá vlna elektromagnetického spektra je charakterizována vlnovou délkou (λ) a frekvencí (ν). Vlnová délka je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny, je udávána v metrech nebo jeho násobcích (nejčastěji v nanometrech – $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$ nebo mikrometrech – $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Frekvence představuje počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času, měří se v Herzích (Hz). Mezi frekvencí a vlnovou délkou platí nepřímá úměra: $c = \lambda \cdot \nu$

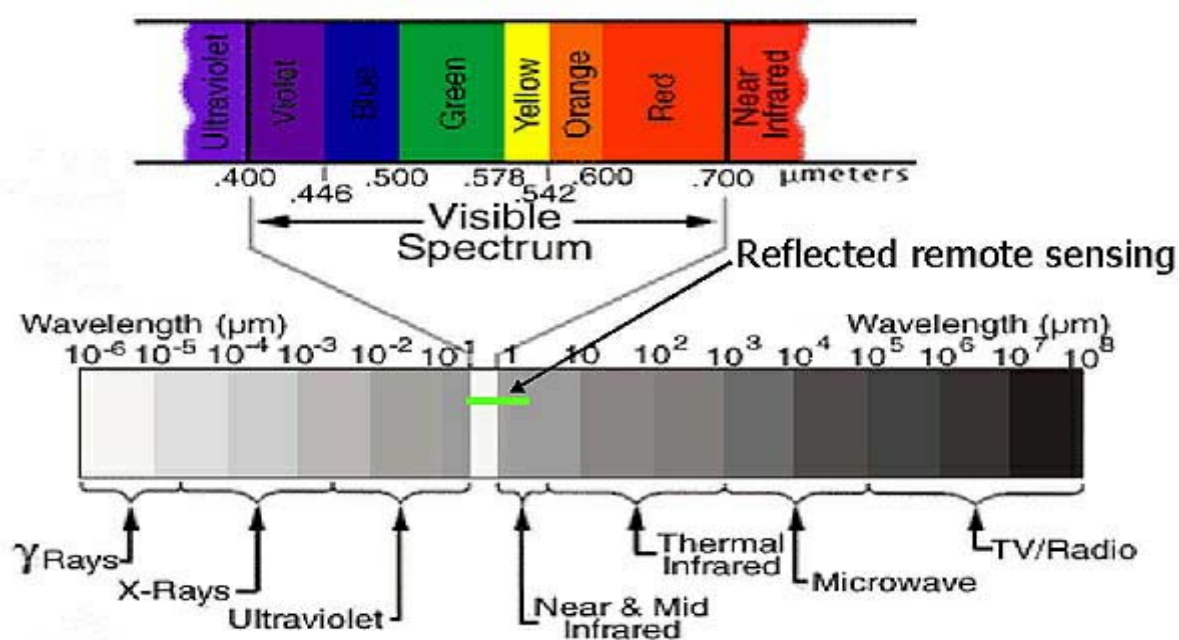
Celé spektrum (viz Obr. 1) se na základě vlnové délky dělí na několik oblastí (podle Dobrovolného, 1998):

- ultrafialové záření - UV (0,1 - 0,4 μm),
- viditelné záření - VIS (0,4 - 0,7 μm),
- blízké infračervené záření - NIR (0,7 - 1,4 μm),
- střední infračervené záření - SWIR (1,4 - 3 μm),
- tepelné záření - TIR (3 μm až 1 mm),
- mikrovlnné záření - MW (1 mm až 1 m).

Všechny materiály o teplotě vyšší než absolutní bod mrazu (-273°C) vydávají elektromagnetické záření. Objekt, který pohlcuje všechno dopadající záření nazýváme černým tělesem. Černé těleso je samo o sobě také vynikajícím zářičem a vyzařuje svou energii v širokém vlnovém rozsahu. Takovým tělesem je i naše Slunce, jehož povrchová teplota je asi 6000°K . Platí, že čím vyšší je teplota tělesa, tím větší je vyzařovaná energie a tím více se také maximum záření posouvá do oblasti kratších vlnových délek. Sluneční záření s maximem uváděným nejrůznějšími autory nejčastěji okolo pěti set nanometrů (550 nm – Stehlík et al., 1983; 475 nm – Klabzuba, 2002; 500 nm - Dobrovolný, 1998) je tedy nejvhodnějším nositelem informace v oblasti viditelného spektra. Zemský povrch i atmosféra jsou schopny také vyzařovat energii, mají ale podstatně nižší teplotu než povrch Slunce, proto je intenzita zářivých toků nižší a také spektrální složení odpovídá této teplotě (300°K pro zemský povrch). Většina vyzařované energie je posunuta do oblasti větších vlnových délek. Souborně se toto záření označuje jako dlouhovlnné.

Elektromagnetická energie nereaguje sama o sobě a projevuje se pouze ve vzájemném působení s materiály. Dostane-li se elektromagnetická energie do styku s objektem, může jím být odražena, pohlcována, propuštěna, případně rozptýlována. Objekt může energii také vyzařovat, případně sám záření pohltit a změnit v energii tepelnou. Druh vzájemného působení elektromagnetického záření a příslušného objektu je závislý na stavu tohoto objektu.

Obr. 1 Elektromagnetické spektrum (podle Fitzgeralda, 2000).



Interakce záření s atmosférou

Při průchodu slunečního záření atmosférou dochází k jeho transformaci, jejíž míra je závislá na: dráze, po níž záření postupuje, fyzikálním a chemickém složení vrstvy atmosféry, kterou sluneční záření prochází. Atmosféra tvoří ve srovnání s poloměrem Země jen velmi tenký plynný obal, který je téměř ze 75 % koncentrován do výšky 10 km.

Zeslabující vliv atmosféry na hodnotu elektromagnetického záření je vyvolán komplexním působením procesů rozptylu, odrazu a pohlcování při styku záření s molekulami plynů, aerosolem, vodní parou a kapkami vody. V pásmu viditelného spektra je hlavním faktorem zeslabení záření rozptyl, zatímco v infračerveném je to pohlcování. Plyny v atmosféře prostupující záření pohlcují a pevné částice je především rozptylují. Pohlcování má výběrový charakter, takže rozložení energie ve spektru slunečního záření na dolní hranici atmosféry doznává oproti horní hranici atmosféry podstatných změn. Vlnové délky, pro něž je vrstva atmosféry více či méně propustná tvoří ve spektru slunečního zář. tzv. atmosférická okna, která mají pro využití metod DPZ (Dálkový průzkum Země) fundamentální význam. Jejich vymezení je v literatuře uváděno rozdílnými hodnotami. Nejvýznamnější jsou: okno propouštějící ultrafialové a viditelné záření (300 - 750 nm a 770 – 910 nm) na povrch Země, okno propouštějící dlouhovlnné vyzařování Země do kosmu a rádiové okno v oblasti metrových délek (podle Dobrovolného, 1998, Stehlíka et al., 1983 a Klabzuby, 2002).

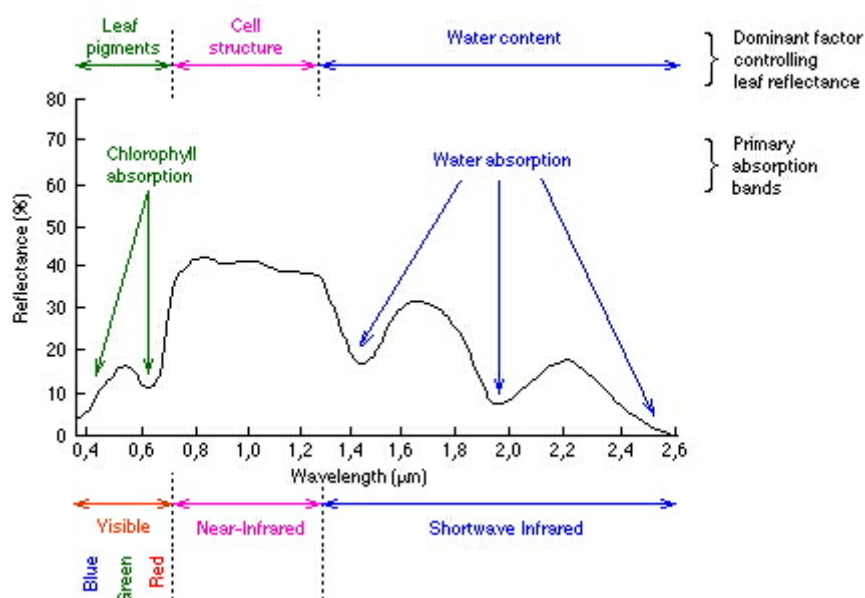
Podstatná část energie slunečního záření je atmosférou a zemským povrchem odražena zpět do kosmického prostoru, přičemž odražené záření podléhá stejným zákonům zeslabení při průchodu vrstvou atmosféry jako přímé sluneční záření. Odražené záření nazýváme Albedo. Je to bezrozměrná veličina a zpravidla se vyjadřuje v procentech.

Spektrální chování vegetace

Při dopadu slunečního záření na zemský povrch dochází k různým druhům jejich vzájemného působení. Sluneční záření může být objekty na povrchu Země odraženo v nezměněné formě, propouštěno, pohlcováno a přetvářeno v jiné formy energie, vyzařováno ve stejných i jiných vlnových délkách, rozptylováno. Kvantitativní podíl jednotlivých proměn závisí na vlnové délce dopadajícího záření a na atomární a molekulární stavbě objektu. V různých vlnových délkách objektem odražené záření teoreticky odpovídá jedinečné spektrální signatuře příslušného objektu.

Přes všechny vlivy, které způsobuje atmosféra a interakce záření na zemském povrchu i přes všechny vlivy, které jsou způsobeny fyzikálním stavem objektů, lze konstatovat, že každá látka na zemském povrchu se vyznačuje svojí vlastní spektrální charakteristikou (Dobrovolný, 1998). Pro každý objekt lze sestavit závislost mezi jeho odrazivostí a vlnovou délkou. Průběh této závislosti bude pro daný objekt více méně typický. Tato charakteristika je označována jako tzv. spektrální křivka odrazivosti. Křivka odrazivosti pro vegetaci má typický průběh (viz Obr. 2). Pro každý rostlinný druh je trochu jiná, stále však zachovává svůj typický průběh s lokálním maximem v zelené části viditelného spektra s významným nárůstem odrazivosti v oblasti blízkého infračerveného záření.

Obr. 2 Spektrální křivka odrazivosti pro zelenou vegetaci (podle Hoffer, 1978 in Broge, 2003, Christensen, 2004).



Odrážnost rostlin je rozdílná v oblasti spektra viditelného (VIS) a blízkého infračerveného (NIR). Ve viditelné oblasti je listová reflexe rostlin dosti nízká a maximem kolem 550 nm (zelená barva) a je ovlivněna hlavně rostlinnými pigmenty – chlorofylem, který může tvořit až 65 % listového pigmentu. Protože pohlcování záření chlorofylem

je nejintenzivnější v modré a červené části viditelného záření a méně intenzivní v zelené části spektra. To také vysvětluje, proč lidské oko vnímá rostliny jako zelené.

V oblasti kolem 700 - 800 nm dochází k výraznému nárůstu odrazivosti, který je typický právě pro vegetaci. Podle různých autorů dosahuje reflexe v NIR hodnot mezi 50 až 70% (Stehlík et al., 1983, Dobrovolný, 1998; Kučera, 2000; Ždímal et al., 2002) oproti průměrným 20 % dopadajícího záření odraženého ve viditelné části spektra. Vysokou reflexi v NIR způsobuje buněčná struktura listu, tj. tvar a uspořádání listových buněk (Ždímal et al., 2002). Čím kolměji je orientována plocha stěny buňky k dopadajícímu záření, tím větší je odraznost (Stehlík et al., 1983). Význam je třeba přikládat i počtu buněčných vrstev listu a jejich struktuře. Dvouděložné rostliny mají vrstvy buněk vertikálně orientované a ohrazené poblíž horní vrstvy listu, zatímco jednoděložné (obilí, kukuřice) mají nediferencovaný mesofyl. Ve VIS není odraznost jednoděložných a dvouděložných diferencována, až v NIR je odraznost dvouděložných zpravidla větší (Hoffer a Bauer, 1980 in Stehlík et al., 1983), neboť dorsiventrální uspořádání buněk způsobuje vyšší odraznost.

Odrážnost rostlin se však podle Stehlíka (1983) mění i v průběhu jejich růstu. Odrážnost mladého listu je malá: ve žluté a červené části spektra je relativně zřetelnější, nejvýraznější je v NIR. Vliv zde má pravděpodobně často silné ochranné odění mladých listů (chloupky, štětinky, žlásky).

V následující růstové periodě ochlupení nezřídka ustupuje a povrch listů je pro záření dosažitelnější. Odrážitelnost v NIR klesá, což je způsobeno určitou absorpcí chlorofylu v červené oblasti. Ochmýřením se původně silnější absorpce zelené redukuje a výsledkem je nárůst reflexe. S přibývajícím obsahem chlorofylu dochází k zesílení modré a červené absorpce, která dokonce přesahuje do zelené oblasti. To má za následek redukcí zelené reflexe, kterou oko přijímá jako tmavší barvu. Během této růstové periody se dále vyvíjí mesofyl, mezibuněčné vzduchové prostory se zvětšují a způsobují silnější infračervenou reflexi.

U vyzrálého listu se reflexní charakter prakticky nemění, pokud není rostlina pod vlivem vnějších změn, jakými jsou např. kolísání klimatických podmínek, výskyt chorob, vliv hnojení, půdy apod. Prudká změna odraznosti na konci vegetačního období je způsobena pigmentovou změnou, ubýváním chlorofylu a přibýváním anthokyaninu. Absorpce způsobená anthokyanem v modré části je velká, tudíž žlutá reflexe narůstá. Dalším rozpadem pigmentu list vysychá, takže modrá a zelená absorpce vzrůstá. Suchý list má menší odraznost (patrně v délkách 800 nm). Ve středu IR části spektra reflexe poněkud narůstá vlivem redukce absorpce vody.

MATERIÁL A METODIKA

Stručný přehled vědeckých prací ani zdaleka nevyčerpává obsáhlou bibliografii, která k problémům spektrálních charakteristik v současné době existuje. Většina autorů se však omezuje na zpětné vyhodnocování družicových snímků či provádí izolovaná (polní nebo laboratorní) měření na jednotlivých rostlinách. Proto bylo nutné vytvořit si na základě

získaných znalostí vlastní metodický postup, který by mohl vést k co nejpřesnějším výsledkům.

Hypotézy

Pro řešení projektu jsme si stanovili tři pracovní hypotézy:

- ❑ jsme schopni snímkováním rozlišit strukturu porostu (hustotu)?
- ❑ jsme schopni snímkováním rozlišit vliv dávek dusíku?
- ❑ dokážeme zjistit rozsah variability spektrálních vlastností porostu na základě agrotechnických zásahů a genotypových rozdílů?

Lokality

Pro řešení projektu jsou využívány polyfaktoriální a odrůdové maloparcelní polní pokusy s ozimou pšenicí a jarním ječmenem na dvou lokalitách:

- ❑ Žabčice u Brna (49° 01' severní šířky, 16° 37 ' , východní délky, 179 m nad mořem) – výrobní oblast kukuřičná, půdní typ fluvizem glejová, půdní druh - půda jílovito písčité (51 % jílnatých částic), průměrná roční teplota 9,1 °C, roční suma srážek 518 mm.
- ❑ Kroměříž (49° 17' severní šířky, 17° 22' východní délky, 235 m nad mořem) – výrobní oblast řepařská, půdní typ černozem fluvická, půdní druh – půda hlinitá (42 % jílnatých částic), průměrná roční teplota 8,7 °C, roční suma srážek 559 mm.

Snímkování

Snímkování multispektrální kamerou MS 3100 Duncantech v konfiguraci G-R-NIR bylo prováděno z výšky 5 metrů nad porostem ozimé pšenice (odrůda Cubus) a jarního ječmene (odrůda Malz) v agronomicky významných etapách růstu a vývoje (dle Zadokse):

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| ❑ v plném odnožování – DC 25, | ❑ v metání – DC 55, |
| ❑ na začátku sloupkování – DC 31, | ❑ v kvetení – DC 65 |
| ❑ na konci sloupkování – DC 37, | ❑ v plné zralosti – DC 91. |

Odběr vzorků

Zároveň se snímkováním porostu byly odebírány i vzorky porostu z označených míst na parcelkách o ploše $0,5 \times 0,5 \text{ m} = 0,25 \text{ m}^2$ (dělené na 8 dílčích vzorků). Odebrané vzorky byly po jednotlivých stéblech váženy a stanoveny následující charakteristiky:

- ❑ na úrovni výhonků (počet na m^2 , průměrná hmotnost, počet produktivních stébel na m^2),
- ❑ na úrovni rostlin (počet na m^2 , průměrná hmotnost, průměrný počet odnoží),
- ❑ na úrovni porostu (hmotnost nadzemní biomasy na m^2 , hmotnost sušiny nadzemní biomasy na m^2 , anorganické rozborů rostlin na obsah prvků N, P, K, Ca, Mg, stanovení obsahu chlorofylu - a, b i celkového).

Paralelně byly odebírány vzorky půdy z hloubek 0 - 30 a 30 - 60 cm na stanovení obsahu $N_{\min}$, $N-NO_3$ a $N-NH_4$.

Jako faktory ovlivňující stav porostu jsou užívány následující: předplodina, termín setí, výsevek, hnojení dusíkem a odrůda. K hodnocení genotypové variability sledovaných charakteristik způsobené rozdíly mezi odrůdami bylo vybráno deset kontrastních odrůd ozimé pšenice (odrůdy Akteur, Alibaba, Banquet, Batis, Drifter, Ludwig, Meritto, Mladka, Rapsodia a Rheia) a ječmene jarního (Amulet, Bojos, Heris, Hortop, Jersey, Malz, Prestige, Radegast, Respekt a Sebastian).

Zpracování výsledků

Základní statistické charakteristiky (průměr, modus, medián, směrodatná odchylka, variační koeficient, asymetrie a exces hustoty rozložení) budou použity k hodnocení variability struktury porostu (rostlin, odnoží, klasů a zrn). K analýze rozdílů hodnocených znaků mezi variantami pěstebních opatření a mezi odrůdami bude použita analýza variance a následné testování rozdílů.

K hodnocení vztahů mezi spektrálními charakteristikami porostu, množstvím nadzemní biomasy, její strukturou a obsahy živin v rostlinách bude použita korelační a regresní analýza. Analýza obrazu multispektrálních snímků bude zpracována programem Erdas Imagine 8.5 a použita k hodnocení heterogenity porostu.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Protože je projekt teprve v prvním roce řešení, zpracování výsledků především analýza obrazu je velmi zdoluhavý a časově náročný proces, nejsou bohužel v současné době k dispozici všechny kompletní výsledky. Proto jsem se v tomto příspěvku zaměřila spíše na teoretickou část problému a první výsledky budu moci jak pevně doufám uvést při ústní prezentaci.

Z informací v literárním přehledu by se mohlo zdát logické, že pro jednotlivé rostlinné druhy bude možné zjistit jejich spektrální křivku (podobně jako to platí například u hornin a minerálů v geologii). Problém diferenciací jednotlivých rostlinných druhů na základě jejich spektrálních charakteristik je však ve skutečnosti daleko složitější. Zvláště důležitý je vliv atmosféry na elektromagnetické záření. Mezidruhovému rozdílu odraznosti vegetace jsou velmi malé oproti jiným objektům a u pěstovaných kultur jsou vážné odlišnosti i genotypové. Spektrální chování vegetace se výrazně mění vlivem růstové fáze, povětrnostních a půdních podmínek. Zatím jsme tedy bohužel ještě daleko od této mety.

Existují sice spektrální křivky jednotlivých zemědělských plodin, ale ty byly získány v laboratorních podmínkách, při nichž je odfiltrována celá řada faktorů, které ve volném prostředí odraznost ovlivňují, znesnadňují a často zcela mění její očekávaný průběh. Například Suits (1972, in Stehlík et al., 1983) zásadně odmítá srovnávat odraznost osamocené rostliny a zapojeného porostu třeba i téže rostliny. Uvádí řadu argumentů: zeslabení záření vlivem úhlu ozáření, vliv atmosféry, postavení listů, stíny, vzájemné překrývání rostlin,

reflexe může být ovlivněna také půdou. Podobně i Colwell (1954, in Stehlík et al., 1983) označil vliv plochy listů, jeho orientaci, propustnost, vliv podloží a úhel dopadu slunečních paprsků jako podstatné faktory, určující odraznost rostlinného krytu. Stehlík (1983) shrnuje problematiku kolísání odraznosti zelených rostlin takto: u mladého listu je odrazivost ovlivněna ochmýřením, později obsahem chlorofylu, dále pak povrchovou strukturou listu, obsahem vody a vzduchu v buněčných prostorách a konečně na konci vegetačního období hrají důležitou roli listová barviva. Neopomenutelnou roli ve zralém stádiu vývoje rostlin má také ubývající množství vody v buněčných i mezi buněčných prostorách.

Všichni autoři se však shodují na jednom, a to je nezbytnost provádění pozemních pozorování snímaných porostů a jejich důležitost pro správné vyhodnocení spektrálních charakteristik. Je třeba si uvědomit, že každý list rostliny část záření odráží, část propouští do nižšího patra a tyto hodnoty jsou rozdílné v různých částech spektra. Listy odrážejí v infračervené oblasti až 70 % záření dopadajícího kolmo na jejich povrch, zatímco ve viditelné oblasti odrážejí v průměru pouze 6-12 % (Ždímal et al., 2002). Elektromagnetické záření, které dopadá na list je v NIR asi z jedné poloviny transmittováno k dalšímu níže položenému listu, od něho se opět částečně odrazí, částečně prostoupí a tak se zvyšuje hodnota odraznosti až do šestého listového patra. Naproti tomu ve viditelné oblasti spektra je horní vrstvou listů reflektováno maximum záření. Důležitá je výška porostu, neboť souvisí s patrovitostí porostu, která hraje důležitou roli v odrazivosti rostlin v NIR. Je nutné zaznamenat i případnou poléhavost plodiny, neboť odraznost polehlého obilí je vyšší než vzpřímených klasů. Stébla v horizontální poloze totiž tvoří hustší vrstvu zelené hmoty, která má vyšší odraznost.

Dále je třeba zmínit i problém zaplevelení, respektive ohnisek plevelů. Výsledný obraz porostu na multispektrálním snímku bude zákonitě zkreslen, pokud jsou v porostu přítomny druhy, které přesahují svojí výškou pěstovanou plodinu nebo mají rozdílný fenologický vývoj.

Závěrem je třeba znovu zmínit deformující procesy, kterým podléhá jak záření procházející od Slunce skrz atmosféru, tak záření prostupující od snímaného objektu k čidlu snímacího zařízení. Navíc je čidlem zaznamenáno také záření rozptýlené v atmosféře a připojuje se k hodnotě záření registrovaného objektu. Vliv rozptýleného záření roste se vzdáleností čidla od objektu. Je proto nejmenší při svislém pozorování. Silné, málo rozptýlené světlo dává velký kontrast a ostré stíny, které znemožňují vyhodnocovat plochy, na které dopadají. Aby byly stíny co nejkratší, snímkuje se obvykle kolem poledních hodin, kdy je Slunce nejvýše, nejlépe výše než 30° nad horizontem.

ZÁVĚR

Hlubší poznání a praktické využití reakcí rostlin na měnící se podmínky prostředí mohou zajistit nově používané experimentální a měřicí postupy, které jsou nedestruktivní, snadno a rychle proveditelné. Ukazuje se, že nové technologie a software původně vyvíjené pro jiné účely mohou být úspěšně využívány i v zemědělství. Mohou poskytovat rychlou informaci o stavu porostu, především výživném, zásobenosti rostlin vodou, napadení chorobami a škůdci, hustotě, struktuře či biomase porostu.

Dlouhodobým cílem všech zainteresovaných v aplikaci technologií dálkového snímání do zemědělské praxe je snížení pracnosti hodnocení stavu porostů, zlepšení přesnosti a vypovídací schopnosti, zkvalitnění rozhodovacích procesů a zvýšení operativnosti při pěstování polních plodin. I když o spektrálním chování vegetace již víme poměrně hodně, stále je mnoho nejasností v otázkách prostorové a časové variability sledovaných charakteristik a jejich vzájemné interakci.

Príspevek je součástí řešení projektu GAČR (521/05/2299) „Zefektivnění metod hodnocení stavu a struktury porostu obilnin“ a výzkumného záměru MSM 2532885901 „Optimalizace faktorů trvalé udržitelnosti rostlinné produkce na základě vývoje geneticko-šlechtitelských, diagnostických a rozhodovacích metod“ řešených firmou Agrotest, zemědělské zkušebnictví, poradenství a výzkum, s.r.o.

LITERATURA

Broge N. H. (2003): Prediction of Green Canopy Area Index and Canopy Chlorophyll Density of homogenous canopies from measurements of spectral reflectance in the visible and near-infrared domain. PhD. thesis. Danish Institute of Agricultural Sciences, Foulum, Denmark, 199 pp.

Canadian Space Agency: Fundamentals of Remote Sensing.

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/learn_e.html

Dobrovolný, P. (1998): Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Katedra geografie, 210 s.

Fitzgerald G. J. (2000): Hyperspectral Remote Sensing Systems and Analysis. USDA-ARS, Shafter, California, USA

<http://webpages.acs.ttu.edu/smaas/asa2000/fitzgerald.hmt>

Christensen L. K. (2004): NPK Deficiencies Discrimination by use of Spectral and Spatial Response. PhD. thesis. The Royal Veterinary and Agricultural University, Department of Agricultural Sciences, Copenhagen, Denmark, 42 pp.

Klabzuba, J. (2002): Záření Slunce, Země a atmosféry, ČZU v Praze, 42 s.

Kučera T. (2000): Studium procesů v atmosféře metodami DPZ.

http://www.sci.muni.cz/~dobro/atmosfera_1.html

Stehlík O., Plánka L., Vaněčková L., Nováček V. (1983): Předběžný katalog spektrálních vlastností vybraných objektů pro interpretaci fotografických materiálů v dálkovém průzkumu Země, Geografický ústav ČSAV Brno, 135 s.

Ždímal V., Axman P., Pospíšil J. (2002): Komponenty precizního zemědělství jako příkladu integrace IT.

http://gis.vsb.cz/Publikace/Sborniky/GIS_Ova/GIS_Ova_2002/Sbornik/Referaty/zdimalr.htm